

玻璃纤维增强塑料土钉支护技术特性研究

林明博¹, 张诚成², 张 军², 朱鸿鹄²

(1. 深圳市工勘岩土工程有限公司, 广东 深圳 518026; 2. 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093)

摘 要: 玻璃纤维增强塑料土钉是近年来出现的一种新型的边坡支护结构体, 具有自重轻、强度高、耐腐蚀等优点。从玻璃纤维增强塑料土钉的基本特性出发, 综述了该类土钉对边坡的支护机理的国内外研究现状, 比较了传统钢筋土钉和玻璃纤维增强塑料土钉的优、缺点, 并探讨了玻璃纤维增强塑料土钉与土体界面间的力学传递机理, 提出了今后的研究思路。

关键词: 土钉支护; 玻璃纤维增强塑料; 相互作用

中图分类号: TU753

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2012)01-0051-06

Study on Characteristics of Soil Nail Supporting Technique with Glass Fiber Reinforced Polymer

LIN Mingbo¹, ZHANG Chengcheng², ZHANG Jun², ZHU Honghu²

(1. Shenzhen Gongkan Geotechnical Co. Ltd, Shenzhen, Guangdong 518026, China;

2. School of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract: The glass fiber reinforced polymer (GFRP) soil nail is a newly developed structural element for slope stabilization and has the advantages of light dead weight, high strength and high resistance to corrosion, etc. In this paper, based on the basic characteristics of GFRP soil nail, the current research progress on the supporting mechanism of GFRP soil nail for slope was summarized. The merits and demerits of conventional steel soil nail and GFRP soil nail were compared and the mechanical transfer mechanism on the interface between the GFRP soil nail and soil mass was analyzed. The suggestions for further research were briefly presented.

Key words: soil nail supporting; glass fiber reinforced polymer; interaction

土钉支护是岩土治理工程中常见的一种支护形式。所谓“土钉”, 是指在现场原位土体中以较密间距排列的细长杆状构件, 如钢筋或钢管等。一般情况下, 土钉会外裹水泥砂浆或水泥净浆浆体, 制成注浆钉。土钉的主要特征是沿其通长与周围岩土介质接触, 以群体起作用, 与被加固体结合形成一个组合体。当土体发生变形时, 土钉被动承受拉力, 对土体施加约束力, 从而达到加固效果。

作为一种常见的边坡支护形式, 土钉在工程实践中最早在 20 世纪 70 年代的欧洲应用。20 世纪 80 年代以来, 土钉支护在英、美、德、法等西方国家得到了较为广泛的应用。经过长期的工程实践和科学研究, 逐渐形成了较系统的技术文献、分析程序和设计方法。由于土钉具有经济可靠、适用性强、施工快速简便等优点^[1-2], 20 世纪 90 年代以来在我国得到了迅速的推广和应用。在基坑开挖、边坡治理等工程中, 土钉支护现已成为一项较为成熟的岩土加固技术。

目前工程中应用最广的土钉是以钢筋作为筋体的土钉。由于钢筋存在易腐蚀等缺陷, 土钉在我国一般

收稿日期: 2011-08-24

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金项目(1092020603); 南京大学人才引进培养基金项目(0206172101); 南京大学大学生创新训练计划项目(XZ1110284066)

作者简介: 林明博(1981—), 男, 海南文昌人, 国家注册岩土工程师, 主要从事岩土工程设计及监测工作。

E-mail: chinaslope@163.com

用于临时性支护,而很少应用于永久性边坡工程^[3]。近年来出现的玻璃纤维增强塑料(glass fiber reinforced polymer, GFRP)具有自重轻、强度高、耐久性好等优点,在建筑结构、桥梁工程等很多领域开始替代钢筋。但对于这种由人工合成材料制成的新型土钉,其力学特性及其与边坡之间的相互作用规律尚缺乏深入的认识,影响了该类土钉在工程中的应用。本文对玻璃纤维增强塑料土钉用于边坡支护的研究现状做了一个较全面的综述,并对比了传统钢筋土钉和新型玻璃纤维增强塑料土钉的基本特性和加固机理,提出了进一步的研究思路。

1 传统土钉支护机理及不足

1.1 土钉支护机理

20 世纪 90 年代,国内外学者对于钢筋土钉加固机理进行了广泛的研究,研究侧重点在于土钉的轴向拉伸、弯曲和剪切效应对土钉加固土体性能的贡献。研究^[4]发现,当土钉处于工作状态时,弯、剪作用可以忽略;接近临界破坏状态时,土钉的抗弯、抗剪效应开始发挥作用,其作用效果取决于土钉抗拔力。因此,土钉抗拔力是土钉设计的一个关键指标。

土钉抗拔力的发挥受到诸多因素的影响,主要包括土体和水泥砂浆的性质、钉-土界面的粗糙度、边坡和钻孔的几何性质等。在我国一般采用对试验土钉进行现场拉拔试验的方法来验证现场土体和钻孔中水泥浆之间的设计粘结强度^[1-2]。近年来,通过一系列室内大型直剪试验^[5]、现场或室内拉拔试验^[6-7],人们对钉-土界面力学性质和土钉抗拔力的影响因素有了更深入的认识,取得了一些有价值的成果。

在理论分析方面,秦四清等^[2]较全面地总结了土钉的抗拔机理,认为土钉支护体系的抗拔力应由钉-土作用抗拔力和土体自承作用抗拔力两部分组成。Luo、屠毓敏和 Bobet 等^[8-10]分别从弹塑性理论、土拱效应、剪滞力理论出发,建立了土钉拉拔理论模型。Zhou 等^[11]把钉-土间的压力分为三部分,包括工后土体内压力、土剪胀引起的压力、土钉受弯引起的压力,由此建立了钉-土相互作用的简化数学模型。Su 等^[12]采用 Abaqus 软件建立了一个三维有限元模型,用于模拟土钉拉拔试验。模拟结果显示,土钉抗拔力和上覆压力之间没有明显的相关性,但受剪胀角的影响很大。

1.2 土钉主要缺陷

作为边坡支护的重要型式,传统土钉的主要材料是钢筋或钢管,因此存在着如下缺陷^[1-2]:

- 1) 钢筋是不可再生资源,大量应用于工程会加剧资源危机;
- 2) 钢筋比重大,增加了材料运输和施工的难度,进而提高了工程造价;
- 3) 钢筋耐久性差,长期埋置于含水率高的土中会发生严重腐蚀,使钉土界面粘结力降低,影响支护效果;当钢筋表面发生一定锈蚀后,土钉的抗拉强度会相应降低,影响对边坡体的加固能力。

传统土钉的这些缺点中,钢筋的耐久性是对工程实践影响最大的潜在危机,尤其是对永久性边坡支护而言。在美国、英国、美国、日本等发达国家,建造在海洋及含氯化物介质的环境中的房屋建筑、桥梁结构等钢筋混凝土结构中,钢筋锈蚀现象较突出。高含水率、富含侵蚀性离子(如硫化物、氯化物)的工作环境决定了土钉锈蚀问题必然尤其严重。

从土钉锈蚀的原因来看,由于土钉通常处于拉伸阶段,在受力过程中包裹钢筋的水泥会逐渐产生张拉微裂纹,使得边坡体中的水通过这些通道缓慢渗入土钉,从而导致钢筋的锈蚀。另外,由于土钉支护检测手段的落后,土钉的建造质量在现场难以得到保证,当灌浆体密实性较差、保护层厚度不足时,地表、地下水会加速渗入钢筋表面,加速钢筋的锈蚀。当钢筋表面发生一定程度的锈蚀后,钢筋和水泥界面的咬合力以及土钉的抗拉强度明显降低,使得土钉逐渐丧失对边坡体的加固作用。而土钉支护结构又是隐蔽工程,一旦出现耐久性问题,无法及时更换或加固,后果往往非常严重。为了尽可能消除这一隐患,国外施工过程中曾采取过若干措施^[1,3],如:德国采取的是在钢筋筋体外面包裹塑料套管;美国常在钢筋表面涂以环氧树脂静电涂层;法国则在工程现场专门安装了许多供今后检查的备用土钉,每隔十年拔出检查其锈蚀程度;我国香港地区则多采用镀锌的方式来延缓钢筋的锈蚀。这些方法虽然起到了一定的作用,但或是增加了施工难度,或是增加了工程的造价。而对该问题最有效、最彻底的解决方法,是寻找一种能克服以上缺陷的新材料,作为钢筋土

钉的替代品。

2 玻璃纤维增强塑料土钉基本特性

近年来逐渐出现在岩土工程中的玻璃纤维增强塑料筋材不仅具有良好的力学性能,还可以很好得解决土钉的耐久性问题。玻璃纤维增强塑料是一种以玻璃纤维与树脂基体(环氧树脂、乙烯基树脂、不饱和聚酯树脂等)通过挤压等方法复合制成的各向异性材料,见图 1。韩国、日本、美国、加拿大等发达国家和我国香港地区,玻璃纤维增强塑料筋体已经开始在工程实践中部分取代钢材,并成功地应用于桩基础^[13]、土工格栅^[14]、锚杆^[15]和土钉^[16]等工程中。相关国际规范和指导手册相继出现,而国内对这种新型筋体的认识还不足,而对于玻璃纤维增强塑料土钉的研究更是鲜见系统性的成果。

2.1 玻璃纤维增强塑料土钉的优点

相对于钢、铝等常用的材料来说,玻璃纤维增强塑料材料具有很多工程优点^[16-17],如:

- 1)自重轻,密度仅为钢筋的 15%~20%。制造和现场安装、操作的人工费用可大大节省;
- 2)强度高,抗拉强度与相同直径的钢筋在同一个量级上;
- 3)耐久性好,不存在锈蚀问题;
- 4)弹性模量小,约为钢筋的 25%~70%,而热膨胀系数与钢筋接近。热应力要远小于钢筋,可有效抑制水泥砂浆的干缩和开裂现象;

5)目前传统的监测技术无法准确、实时监测土钉的受力、变形,而玻璃纤维增强塑料材料与光纤传感器均由纤维材料制成,相互间具有很强的兼容性,所以可将光纤传感器植入玻璃纤维增强塑料筋材内,制成玻璃纤维增强塑料智能筋体,以实现自动监测和损伤诊断等功能。

2.2 玻璃纤维增强塑料土钉的缺陷

然而,在工程实践中也发现了以下几个问题^[16-17]:

1)由于玻璃纤维增强塑料材料的弹性模量较低,而且为各向异性,在岩土介质中的界面力学特性与普通钢筋土钉相差较大,导致其拉拔机理和破坏模式与钢筋土钉完全不同。与钢筋的刚度相比,玻璃纤维增强塑料材料是一种相对柔性的支护结构。剪切刚度和抗弯刚度较小,因而土钉在边坡的潜在滑裂面位置可能有较大的横向剪切位移和挠度。

2)玻璃纤维增强塑料材料的受力变形性状具有明显的与时间有关的效应。该土钉在永久性边坡防治工程中的推广应用,首先要掌握的是该类筋体在蠕变效应的作用下发生的长期受力变形性状。

3)玻璃纤维增强塑料材料在潮湿环境和高温情况下的力学特性会被弱化。玻璃纤维增强塑料筋体的耐久性会受到弱碱性的外裹水泥灌浆体的影响。由于这种侵蚀作用首先发生在玻璃纤维增强塑料筋体和水泥接触的表面,所以该界面处的粘结力会因此而降低。

4)玻璃纤维增强塑料材料的热膨胀效应是横向比纵向强很多,所以在温度大幅度变化和循环时,界面粘结力也会出现降低的现象。

虽然玻璃纤维增强塑料土钉存在以上的不足,但是鉴于玻璃纤维增强塑料土钉具有耐腐蚀、施工简便、工程造价低和环保等特点,开展玻璃纤维增强塑料土钉和边坡相互作用特性研究对于其在边坡治理工程中的应用,取代传统的钢筋土钉,具有非常重要的理论与工程应用价值。

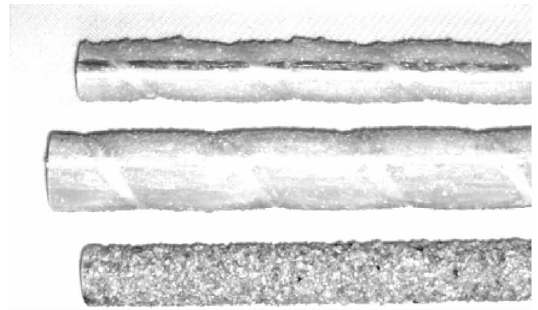


图 1 典型的用于岩土加固的玻璃纤维增强塑料筋体图
Fig. 1 Typical GFRP bars for rock and soil reinforcements

3 玻璃纤维增强塑料土钉支护机理

3.1 玻璃纤维增强塑料土钉-土体的界面力学特性

在工作状态,玻璃纤维增强塑料土钉存在着两个界面,玻璃纤维增强塑料筋体与水泥砂浆的界面以及水

泥砂浆与土体的界面。国内外学者对于玻璃纤维增强塑料筋体和混凝土界面的粘结力曾进行了大量的系统研究^[18-22]。研究发现,玻璃纤维增强塑料筋体-混凝土界面的粘结力要小于变形钢筋-混凝土界面的粘结力。

Benmokrane 等^[15]进行了一系列玻璃纤维增强塑料筋体在混凝土和岩石试块中的拉拔试验。在岩石中,该类筋体发生的滑移量大大超过了同样情况下钢筋的位移。这种现象可能是由于玻璃纤维增强塑料材料弹性模量较低造成的。Frost 等^[18]通过试验发现,玻璃纤维增强塑料材料和砂土之间的界面滑移规律表现出了与钢完全不同的特点。

Cheng 等^[17]和 Yeung 等^[19]通过试验发现,玻璃纤维增强塑料土钉在拉拔时的性状与钢筋土钉完全不同。Zhu 等^[16]将光纤布拉格光栅传感器安装在玻璃纤维增强塑料土钉表面,制成玻璃纤维增强塑料智能土钉,对其进行了现场拉拔试验。试验在土钉拉拔过程中测到了很大的拉应变;拉应变在灌浆段呈近似直线型分布,土钉拉拔力-位移曲线呈高度非线性关系。分析指出,在拉拔过程中,玻璃纤维增强塑料筋体-水泥砂浆界面上不仅产生了微裂缝,而且还存在着明显的剥离现象(图 2);而钢筋土钉由于整体刚度大,剥离现象可以忽略。在试验基础上,建立了简化的双曲线模型(图 3),对玻璃纤维增强塑料土钉-土体界面力学特性进行了数值模拟,并系统分析了土钉直径、钉-土界面抗剪强度、钉土模量比等因素对拉拔性状的影响。

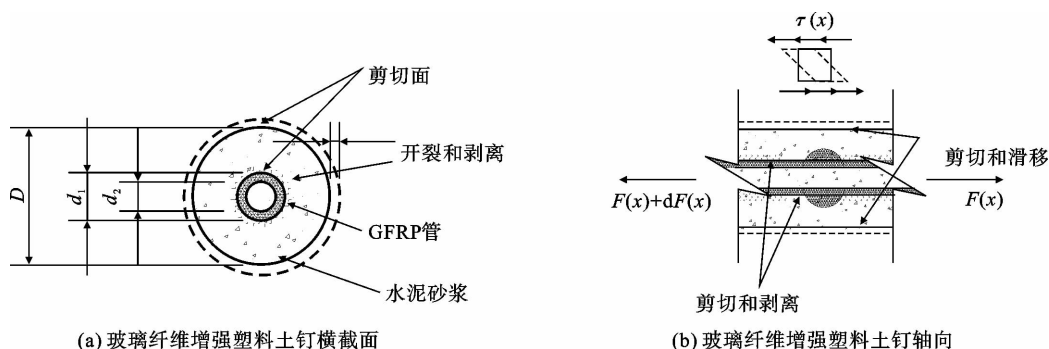


图 2 玻璃纤维增强塑料土钉-土体界面力学特性图^[16]

Fig. 2 Mechanical characteristics of the interface between GFRP soil nail and soil mass

黄生文等^[20]深入分析了玻璃纤维增强塑料土钉的主要特点,并对玻璃纤维增强塑料筋体抗拉强度和黏结强度及玻璃纤维增强塑料土钉承载力分别进行了室内试验和现场拉拔试验。研究表明,玻璃纤维增强塑料筋体的受拉破坏模式为脆性破坏;玻璃纤维增强塑料筋体与水泥砂浆的黏结强度取决于砂浆体的抗剪强度;长度较短的玻璃纤维增强塑料土钉承载力大小主要取决于土钉表面与土体间的抗剪强度。该研究也证明了玻璃纤维增强塑料土钉可广泛用于永久性边坡支护,并且特别适用于污染土、盐渍土等恶劣环境。

马崇武等^[21]通过室内拉拔试验,研究了水泥砂浆粘结玻璃纤维增强塑料土钉在粉土中的拉拔特性。试验发现,与钢筋土钉类似,玻璃纤维增强塑料土钉与周围土体界面的视摩擦角远远大于土体的内摩擦角。这是钉-土界面的剪胀效应所造成的。

3.2 玻璃纤维增强塑料土钉加固边坡的稳定性研究

由于玻璃纤维增强塑料土钉在边坡工程中尚未得到广泛应用,相应的研究成果较少。李明等^[22]对玻璃纤维增强塑料土钉进行了现场拉拔试验,发现玻璃纤维增强塑料土钉与混凝土具有良好的锚固粘结性,但拉拔位移要大于钢筋。通过对公路边坡现场土钉应变、土压力监测数据的分析,验证了玻璃纤维增强塑料土钉

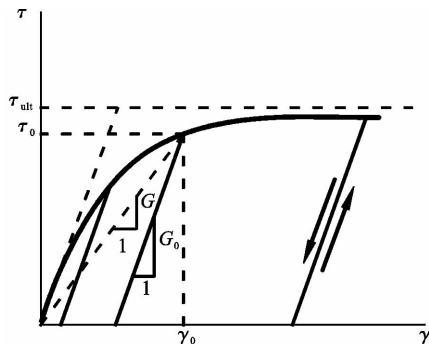


图 3 玻璃纤维增强塑料土钉-土体界面力学模型图^[16]

Fig. 3 Mechanical model of the interface between GFRP soil nail and soil mass

加固边坡地质体的有效性。

李志刚等^[23]在分析玻璃纤维增强塑料土钉拉拔特性的基础上,用有限元对钢筋土钉、玻璃纤维增强塑料土钉和预应力玻璃纤维增强塑料土钉三种支护基坑侧壁的变形与破坏进行了对比分析。数值分析结果表明,玻璃纤维增强塑料土钉支护发生的变形与钢筋土钉、预应力 GFPR 土钉支护区别很大;对于深度较小的基坑,预应力玻璃纤维增强塑料土钉与钢筋土钉支护基坑侧壁的变形较为接近;三种支护方式在基坑沉降方面区别不大。

在适用性方面,由于玻璃纤维增强塑料土钉具有优良的耐久性,因此对排水、降水的要求可以大大降低,甚至可以考虑在地下水位以下加固坡体。值得注意的是,既然玻璃纤维增强塑料土钉在工作状态会产生相当大的位移,所以该类土钉用于支护实际边坡时,边坡变形量必须控制在适当的范围内。否则即使边坡未发生结构性破坏,也会影响边坡及周边结构物的正常使用。

4 结语

土钉作为一种经济可靠的岩土支护结构,在工程实践中具有很大的意义。应用玻璃纤维增强塑料土钉用于边坡支护,特别是永久性边坡支护,还存在着需要探讨的问题:

1)准确量化抗拔力的大小对于提高土钉支护设计效率具有重要的指导意义。目前尚缺乏从玻璃纤维增强塑料土钉抗拔机理出发对抗拔力进行定量评价的理论和方法。玻璃纤维增强塑料筋体的材料、截面型式、尺寸大小、表面粗糙度,水泥砂浆的水灰比、抗压强度,岩土介质的强度等因素对土钉-土体界面的粘结强度及土钉抗拔力的发挥都有很大的影响,其中的规律有待于进一步研究。

2)玻璃纤维增强塑料土钉加固边坡的长期工作性能和边坡稳定性研究。不仅降雨、加卸载等环境因素会对玻璃纤维增强塑料土钉边坡的稳定性带来不利的影响,而且由于玻璃纤维增强塑料土钉自身的蠕变、老化等也会引起土钉-岩土体界面粘结力的降低,导致玻璃纤维增强塑料土钉长期加固能力的退化。因此,有必要通过室内或现场试验对此进行更深入的研究。

参考文献:

- [1]陈肇元,崔京浩.土钉支护在基坑工程中的应用[M].2版.北京:中国建筑工业出版社,2000.
- [2]秦四清,王建党.土钉支护机理与优化设计[M].北京:地质出版社,1999.
- [3]段东明,张明聚,郜新军,等.永久性土钉支护工程及其耐久性设计[J].北京工业大学学报,2006,32(9):778-783.
DUAN Dongming,ZHANG Mingju,GAO Xinjun,et al. The permanent engineering of soil nailing and its durability design [J]. Journal of Beijing University of Technology,2006,32(9): 778-783.
- [4]JEWELL R A,PEDLEY M J. Soil nailing design: the role of bending stiffness[J]. Ground Engineering,1990,23(2):30-36.
- [5]CHU L M,YIN J H. Comparison of interface shear strength of soil nails measured by both direct shear box tests and pullout tests[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,ASCE,2005,131(9):1097-1107.
- [6]PRADHAN B,THAM L G,YUE Z Q,et al. Soil-nail pullout interaction in loose fill materials[J]. International Journal of Geomechanics,ASCE,2006,6(4): 238-247.
- [7]YIN J H,SU L J,CHEUNG R W M,et al. The influence of grouting pressure on the pullout resistance of soil nails in completely decomposed granite fill[J]. Geotechnique,2009,59(2):103-113.
- [8]LUO S Q,TAN S A,CHEANG W,et al. Elastoplastic analysis of pull-out resistance of soil nails in dilatant soils[J]. Ground Improvement,2002,6(4):153-161.
- [9]屠毓敏,金志玉.基于土拱效应的土钉支护结构稳定性分析[J].岩土工程学报,2005,27(7):792-795.
TU Yumin,JIN Zhiyu. Stability analysis of soil-nailing protection structure based on the soil-arch effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2005,27(7):792-795.
- [10]BOBET A,LEE H S,SANTAGATA M C. Drained and undrained pullout capacity of a stiff inclusion in a saturated poro-elastic matrix[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,2007,31(5):715-734.
- [11]ZHOU W H,YIN J H. A simple mathematical model for soil nail and soil interaction[J]. Computers and Geotechnics,2008,35(3):479-488.
- [12]SU L J,YIN J H,ZHOU W H. Influences of overburden pressure and soil dilation on soil nail pull-out resistance[J]. Com-

puters and Geotechnics, 2010, 37(4):555-564.

- [13]ISKANDER M, HASSAN M. State of the practice review: FRP composite piling[J]. Journal of Composites for Construction, 1998, 2(3):116-120.
- [14]MIYATA K. Walls reinforced with fiber reinforced plastic geogrids in Japan[J]. Geosynthetics International, 1996, 3(1):1-11.
- [15]BENMOKRANE B, XU H, BELLAVANCE E. Bond strength of cement grouted glass fibre reinforced plastic (GFRP) anchor bolts[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1996, 33(5):455-465.
- [16]ZHU H H, YIN J H, YEUNG A T, et al. Field pullout testing and performance evaluation of GFRP soil nails[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2011, 137(7):633-641.
- [17]CHENG Y M, CHOI Y K, YEUNG A T, et al. New soil nail material-pilot study of grouted GFRP pipe nails in Korea and Hong Kong[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2009, 21(3):93-102.
- [18]FROST J D, HAN J. Behavior of interfaces between fiber-reinforced polymers and sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1999, 125(8):633-640.
- [19]YEUNG A T, CHENG Y M, THAM L G, et al. Field evaluation of a glass-fiber soil reinforcement system[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, 2007, 21(1):26-34.
- [20]黄生文, 邱贤辉, 何唯平, 等. FRP 土钉主要性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(8):74-78.
HUANG Shengwen, QIU Xianhui, HE Weiping, et al. An experimental study on the performance of FRP soil nails[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(8):74-78.
- [21]马崇武, 刘忠玉, 周高永. 砂浆粘结 GFRP 土钉抗拔承载力室内试验研究[J]. 郑州大学学报:工学版, 2011, 32(2):71-74.
MA Chongwu, LIU Zhongyu, ZHOU Gaoyong. Laboratory experimental study on pullout resistance of mortar grouted GFRP soil nails[J]. Journal of Zhengzhou University:Engineering Science, 2011, 32(2):71-74.
- [22]李明, 汪明, 何唯平, 等. 公路边坡 GFRP 土钉支护现场试验研究[J]. 工业建筑, 2009(增):314-318.
LI Ming, WANG Ming, HE Weiping, et al. Field experimental research of GFRP rockbolt strengthening highway side slope [J]. Industrial Construction, 2009(S):314-318.
- [23]李志刚, 贾洪, 秦四清, 等. 复合材料土钉受力机制及数值分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(12):1953-1962.
LI Zhigang, JIA Hong, QIN Siqing, et al. Mechanical characters of composite material soil-nail and numerical analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(12):1953-1962.